

2003-2017年北京市地表热力景观时空 分异特征及演变规律

乔 治¹, 黄宁钰¹, 徐新良², 孙宗耀³, 吴 晨¹, 杨 俊⁴

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息
系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014;
4. 辽宁师范大学人居环境研究中心, 大连 116029)

摘要: 利用2003-2017年MODIS地表温度数据, 分别从数量、形状和结构角度揭示北京市不同季相和昼夜间地表热力景观时空分异特征, 并进一步通过热力等级变化图谱及质心迁移轨迹揭示城市热力景观空间演变规律, 探究热力景观等级转换生态过程。结论如下: ① 城市地表热力景观季节和昼夜空间特征差异显著; ② 中温区在城市热环境中占主导地位。白天中温区是最不稳定的热力景观等级; 夜间次低温区和次高温区不稳定性增加; ③ 地表热力景观等级变化以稳定型占主, 反复变化型和前期变化型次之。地表热力景观等级通常呈现逐级递增或递减规律, 山区呈现逐级降温趋势, 北部城郊—山地交错地带表现出次低温和中温的反复转向, 南部地区有一定的升温趋势; ④ 2003-2017年高温区面积增大且质心向城市中心集中, 低温区质心向城市外围扩散。生态涵养发展区对北京市地表热力景观质心迁移贡献率最高。热力景观时空分异特征及演变规律可为有效缓解城市热岛效应提供管理决策支持。

关键词: 热力景观; 时空格局; 景观指数; 质心轨迹; MODIS; 北京市

DOI: 10.11821/dlxb201903006

1 引言

自中国步入高速城市化阶段, 城区气温明显高于郊区的“热岛效应”愈加显著。热岛效应”受城市下垫面景观类型及其格局影响, 对人居环境质量甚至社会经济发展均产生不同程度的危害^[1-4]。热力景观是依据景观生态学理论和方法分析城市热环境时空格局的新手段^[5-7]。所谓城市热力景观是指城市景观在热力学上的表现, 主要通过地表热辐射温度场的结构和动态变化来表述^[8]。城市热力景观是城市生态环境的综合表征, 深入揭示热力景观时空格局及其形成机制, 能够从整体上诊断城市热环境问题成因机制并进一步防范城市热环境风险^[9-11]。

学者已分别从地表热力景观时空格局特征、演变规律和形成机制等方面对城市热环境进行了研究和分析。陈云浩等构建了热力景观空间格局评价体系并分析了热力景观动态变化和类型组分转移过程^[12]。基于此, 明确各种景观指数意义是科学揭示地表热力景观形成机制的前提^[13-14]。学者针对城市热环境问题较为突出的大都市地区, 利用气象站点

收稿日期: 2017-11-20; 修订日期: 2018-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501472, 41771178) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41501472, No.41771178]

作者简介: 乔治(1986-), 男, 山东滕州人, 博士, 讲师, 研究方向为GIS和遥感应用、土地利用变化、城市热环境。

E-mail: qiaozhi@tju.edu.cn

通讯作者: 杨俊(1978-), 男, 湖北孝昌人, 博士, 教授, 研究方向为土地利用变化、人居环境。

E-mail: yangjun@lnnu.edu.cn

监测数据或以遥感数据作为主要数据源反演地表温度,在此基础上通过多种景观指数分析城市热力景观格局时空特征差异^[15-16]。陈爱莲等以北京部分城区为例,计算24个表征不同类型和水平的景观指数并分析其与地表辐射温度的相关性,揭示景观组成百分比、斑块密度、最大斑块指数和分离度均与地表温度显著相关^[17];空间分析技术与站点监测及遥感技术集成,可提升城市热力景观格局特征和演变规律的时空分辨率并进一步揭示其形成机制^[18-20]。质心迁移方法应用于城市热力景观空间格局及演变特征分析,使不同等级热力景观的迁移和演变规律更加直观,这为热力景观的研究提供了新思路^[15, 21-22]。

已有研究多集中于讨论城市热岛效应年际和季节变化特征,缺乏多时空尺度的分析和对比。同时,深入揭示地表热力景观时空演变规律有助于探索城市热环境变化趋势及其成因,并为缓解城市热岛效应提出改良措施。本文以2003-2017年MODIS地表温度产品为主要数据源,分别从数量、形状和结构角度揭示北京市不同季相和昼夜间地表热力景观时空分异特征,并进一步通过热力等级变化图谱及质心迁移轨迹揭示城市热力景观时空演变规律,最终为调控城市热环境提供决策支持。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区概况

北京市城市空间扩展呈现速度快、范围广等特点,城市规模不断扩大,城市建设用地侵占生态用地并体现出空间聚集发展态势,城市能源消费不断增加,人为热排放显著增加,在一定程度上代表中国大部分城市发展的共性^[23-26]。过快的城市化必然加剧了城市热岛效应并衍生其他生态环境问题。近年来北京市热岛强度总体上呈现增长趋势,其平均值在5.73℃~9.27℃之间,其增长速率为1.35℃/10a,热岛足迹半径达到28km^[27-29]。

2.2 数据来源

地表温度是研究区域地表能量平衡和资源环境变化的重要参数之一^[30-33]。本文选用的地表温度数据为Aqua卫星MODIS地表温度8d合成产品,过境时间为13:30和1:30,反演精度达到1K的精度^[34]。MODIS地表温度产品已被广泛用于城市热岛效应定量研究中^[35-36]。与其他遥感数据对比,尽管Landsat TM/ETM、ASTER和IKONOS等数据具有较高空间分辨率^[37],但MODIS数据可获得一天4次的地表温度数据,较高的时间分辨率对研究城市热环境效应昼夜特征规律具有较大优势,并且1km的空间分辨率也可以满足研究要求^[38]。

2.3 研究方法

2.3.1 MODIS地表温度数据处理 针对原始MODIS地表温度产品,需要进行几何纠正和重采样,并将其像元灰度值(Digital Number, DN)转为地表实际温度值(T_s)^[35]:

$$T_s = DN \times 0.02 - 273.15 \quad (1)$$

对于MODIS地表温度产品被云覆盖的区域像元灰度值为0,根据公式(1)温度将被转换为-273.15℃。因此,在计算季节地表平均温度时需进行云掩膜处理,对被云覆盖的像元不计算,从而去除温度的离群值^[24, 27],最终得到季节地表平均温度空间格局数据。

2.3.2 地表温度时空分布特征 本研究主要分析不同季相和昼夜间地表热力景观空间格局特征,为消除极端年份、季相和昼夜影响,需要对地表温度进行正规化处理。经正规化处理,表征地表温度值的范围分布在0~1之间^[39]。

$$T_{ni} = \frac{T_{si} - T_{s \min}}{T_{s \max} - T_{s \min}} \quad (2)$$

式中: T_{ni} 表示第*i*个像元正规化后的值; T_{si} 为第*i*个像元的实际地表温度; $T_{s\max}$ 和 $T_{s\min}$ 分别表示研究区域地表温度的最大值和最小值。

针对正规化的地表温度数据进行空间等级划分, 采用平均值-标准差方法将地表温度划分为5个热力景观等级^[24, 40], 分别为低温、次低温、中温、次高温和高温(表1), 并制成北京市地表热力等级空间分布图。

表1 地表温度等级区间划分标准

Tab. 1 The classification criteria of land surface temperature

地表温度等级	温度范围
低温	$T_{ni} < T_{mean} - 1.5S$
次低温	$T_{mean} - 1.5S \leq T_{ni} < T_{mean} - 0.5S$
中温	$T_{mean} - 0.5S \leq T_{ni} < T_{mean} + 0.5S$
次高温	$T_{mean} + 0.5S \leq T_{ni} < T_{mean} + 1.5S$
高温	$T_{ni} \geq T_{mean} + 1.5S$

注: T_{ni} 为正规化后的像元值, T_{mean} 为正规化后某年某季节区域所有像元 T_{ni} 的平均值, S 为标准差。

2.3.3 城市热力景观指数选取 从数量、形状和结构角度, 选取景观格局指数研究2003-2017年北京市地表热力景观时空分异规律(表2), 所选取的景观指数包括类型比例(Percentage of Landscape, PLAND)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI)和聚合度指数(Aggregation Index, AI)^[41-45]。

表2 景观指数计算及特征描述

Tab. 2 The calculation of landscape indexes and their characterizations

特征	景观指数	计算公式	变量解释
数量特征	类型比例(PLAND)	$PLAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \times 100$	a_{ij} 为 <i>i</i> 等级地表热力景观中 <i>j</i> 斑块的面积; A 为景观总面积
形态特征	景观形状指数(LSI)	$LSI = \frac{0.25 \times E}{\sqrt{A}}$	E 为所有斑块的边界总长度; A 为景观总面积
结构特征	聚合度(AI)	$AI = \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right) \times P_i \right] \times 100$	g_{ij} 为 <i>i</i> 等级地表热力景观所有像元之间的邻接数; $\max \rightarrow g_{ii}$ 为 <i>i</i> 等级地表热力景观所有像元之间的最大邻接数; P_i 为 <i>i</i> 等级地表热力景观斑块占景观总面积的比例

(1) 数量特征: PLAND表示地表热力景观各等级所占的面积比例。

(2) 形态特征: LSI通过计算热力景观各等级空间形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度来测量其形状复杂程度。结构最紧凑而又简单的几何形状(如圆), 景观形状指数小; 热力景观的形状越复杂或越扁长, 景观形状指数就越大。

(3) 结构特征: AI表示同一热力景观等级的像元聚合形成斑块的邻接关系。它是基于同一等级热力景观中斑块间公共边界长度来计算的。当该等级中所有像元间存在的公共边界达到最大值时, 聚合度指数最大, 表示斑块聚合度最好, 该等级热力景观分布最集中。

2.3.4 城市地表热力景观等级变化图谱信息 以时间序列为轴, 对地表热力景观等级空间分布图进行空间叠加运算, 生成城市地表热力景观等级空间—属性—过程图谱^[46]。图谱以1年为步长, 每5年一个时间单元(2003-2007年、2008-2012年、2013-2017年)进行分类。其中, 前期变化型表示只在2003-2007年地表热力等级发生变化; 中期变化型表示只在2008-2012年发生变化; 后期变化型表示只在2013-2017年发生变化; 反复变化型表示2003年和2017年地表热力等级相同, 但在15年间至少发生两种变化; 持续变化型表示2003-2017年地表热力等级持续发生变化, 且2003年和2017年地表热力等级不同; 稳定型表示2003-2017年地表热力等级未发生变化。计算公式为:

$$A = R_1 \times 10^{n-1} + R_2 \times 10^{n-2} + \dots + R_n \times 10^{n-n} \quad (3)$$

式中: A 为地表热力等级信息变化图谱编码的时空复合体数据; n 为参与计算的热力等级空间分布栅格数据集期数; R_1, R_2, \dots, R_n 为不同年份地表热力等级栅格数据。

2.3.5 质心迁移方法 质心是地理学中描述地理要素或对象空间转变的重要空间指标。质心反映了空间方位的整体异质和“高密度”部分, 它的动态迁移反映了地理要素或对象空间分布的整体迁移轨迹, 对地理事物空间发展识别和未来规划具有较高的应用价值。对于多个地理要素或对象, 质心坐标可用以下公式计算:

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ \bar{Y} &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}\end{aligned}\quad (4)$$

式中: 针对某等级地表热力景观; \bar{X} 和 \bar{Y} 代表该等级热力景观质心经纬度坐标; x_i 和 y_i 分别代表该热力景观各斑块的经纬度坐标; n 代表斑块数量^[23]。

计算各地区对北京市热力景观质心迁移的贡献率 (C) (图1)。首先计算北京市某一热力景观质心迁移路径为 OA , 迁移角度为 $\angle NOA$, 其次将某一区域该热力景观质心迁移路径平行投影至 O 点为原点的位置, 假设投影后的迁移路径为 OB , 迁移角度为 $\angle NOB$ 。根据力矩原理, 从点 B 作 OA 的垂线 BD , OD 即为 OB 对 OA 的贡献^[21]。即:

$$C = \frac{OB \times \cos(\angle NOA - \angle NOB)}{OA} \quad (5)$$

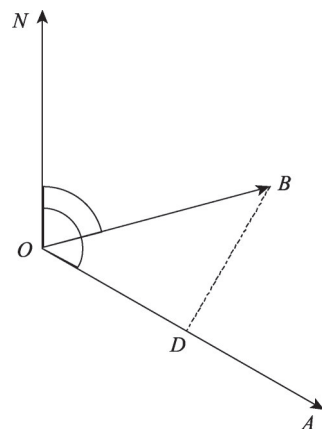


图1 地表热力景观质心迁移区域贡献率计算方法

Fig. 1 Contribution of urban functional zones to the barycenter trajectories of the surface thermal landscape

3 地表热力景观时空格局分异特征及演变规律特征分析

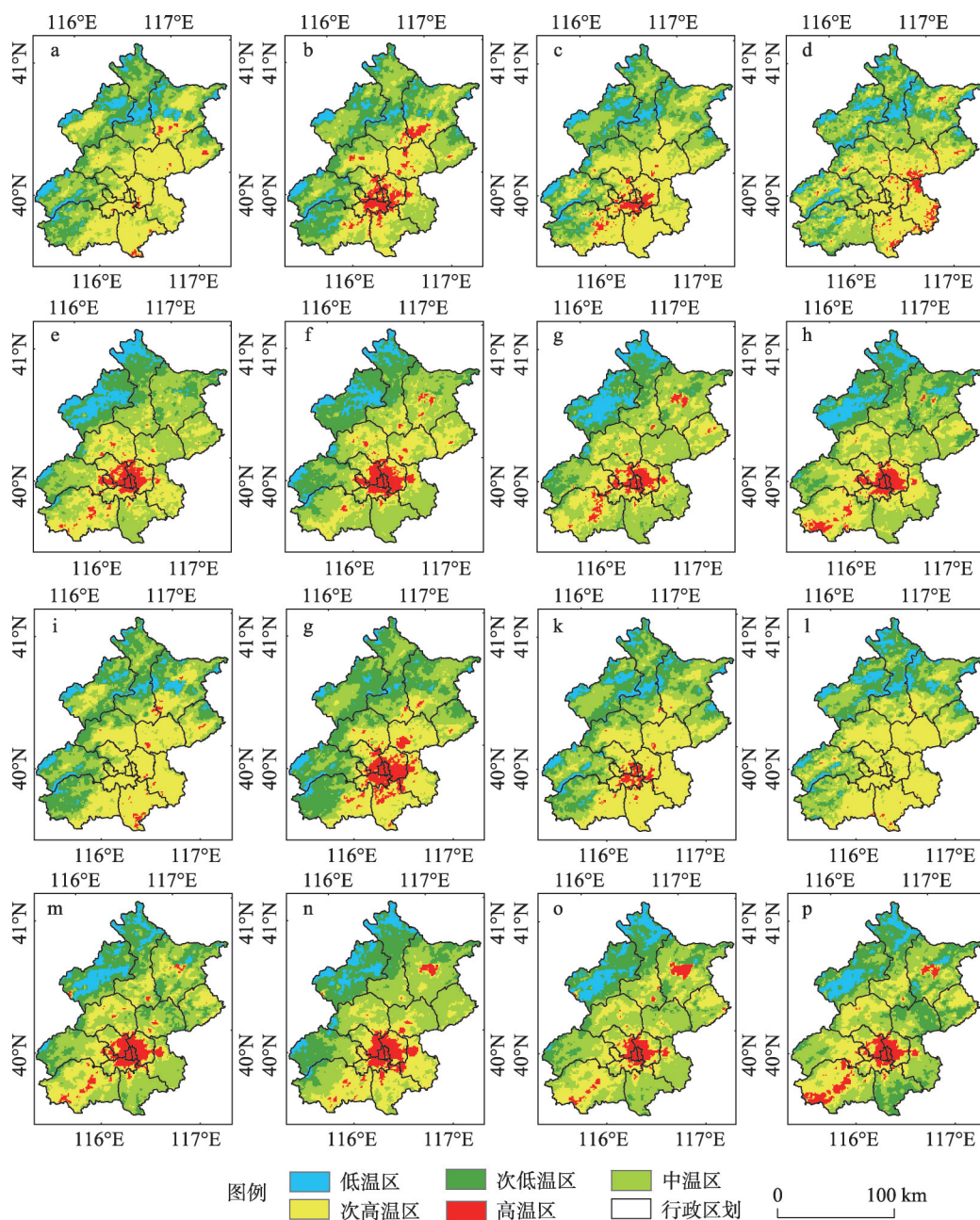
3.1 地表热力景观时空格局

2003年和2017年北京市不同季相和昼夜地表热力景观时空格局分布如图2所示。整体来看, 各季节热力景观空间差异显著, 夏季城市高温区最为集中, 秋季次之, 春季和冬季高温区分布较为零散; 与之相比, 昼夜热力景观空间差异更为显著, 夜间在各个季节均形成较大规模的高温区。对比不同等级热力景观空间分布, 高温区主要集中于北京市六环以内, 次高温区和中温区在高温区外围呈镶嵌状分布, 次低温区和低温区主要分布在怀柔区和延庆区。随着城市规模扩大, 2003-2017年城市热力景观空间格局发生显著变化, 高温区和次高温区面积增大, 向东部和南部地区扩张趋势明显。尤其在西南部房山区的平原与山区交错过渡区, 夜间高温区已呈现明显连片发展的趋势。

3.2 地表热力景观指数分析

3.2.1 数量特征分析 北京市地表热环境中, 中温区在夜间占主导地位 (图3), 其比例远高于其他热力等级; 次高温区在白天占主导地位, 白天面积比例明显高于夜间, 其面积整体呈增长趋势; 白天次低温区较次高温区面积比例小, 但在夜间基本与次高温区持平或略低于次高温区; 高温区和低温区作为面积较小的地表热力景观, 在昼夜间比例显著不同。白天低温区比例明显高于高温区, 夜间高温区比例增加, 略低于低温区。最为显著的区别即夜间高温区比例明显高于白天比例。

对比2003年和2017年不同等级地表热力景观面积比例, 昼夜间各等级热力景观呈现



注: a~d分别为2003年春、夏、秋、冬季节白天;e~h分别为2003年春、夏、秋、冬季节夜间;
i~l分别为2017年春、夏、秋、冬季节白天;m~p分别为2017年春、夏、秋、冬季节夜间。

图2 2003年和2017年北京市地表温度等级空间格局

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of land surface temperatures in Beijing in 2003 and 2017

显著不同的变化趋势。白天,热力景观面积比例变化最明显的是中温区和次低温区。中温区面积比例下降,次低温区增加。次高温区面积比例在冬季有显著增加趋势,从33.19%增加至42.57%。夏季,高温区面积比例从6.14%增加到7.59%,冬季比例从3.18%下降至0.32%。低温区在春、夏、秋季进一步减少,冬季略有增长。夜间,除秋季略有

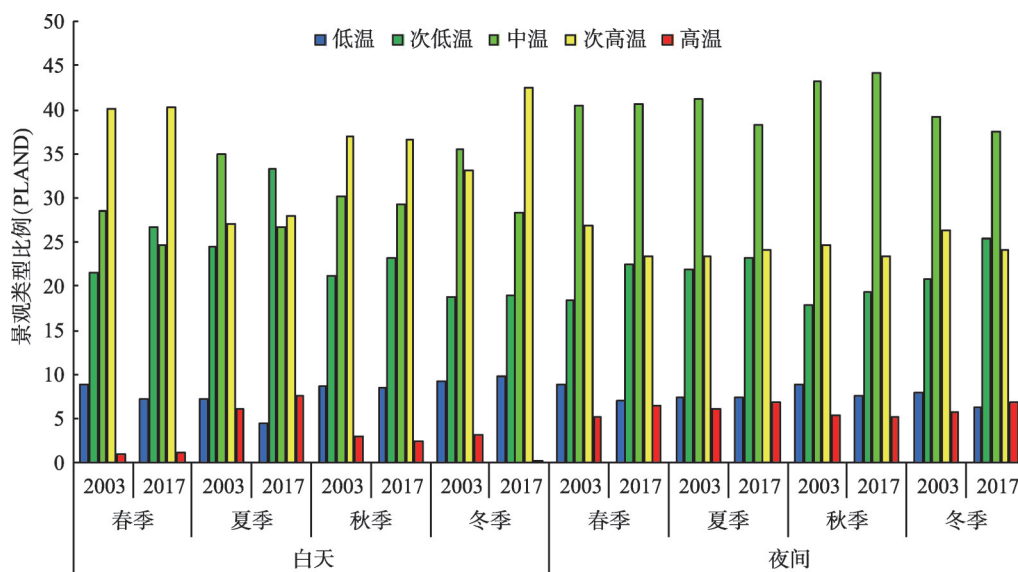


图3 2003年和2017年北京地表热力景观类型比例特征

Fig. 3 Characteristics of land surface thermal landscape patterns in Beijing in 2003 and 2017

下降外, 高温区面积比例在其他季节均呈增长趋势, 其中春季和冬季增加最为明显, 分别增加 1.31% 和 1.19%; 低温区面积比例除夏季略有增加外, 其他各季节均呈减小趋势, 减小最为明显的是春季和冬季, 分别减小 1.97% 和 1.74%; 次高温区面积除夏季增加 0.78%, 其他季节均有所减少。夏季, 中温区比例明显减小, 从 41.20% 下降到 38.18%; 冬季, 次低温区面积比例从 20.87% 增加到 25.36%; 白天中温区和次高温区明显高于其他等级热力景观面积, 夜间中温区占绝对主导地位。从各等级热力景观比例分析, 2003-2017 年白天地表热力景观更集中向次高温区发展。夜间, 地表热力景观变化两极分化严重。温度向次低温区和高温区发展, 地表温度有一定的升高趋势, 但相对白天, 变化趋势较小。

3.2.2 形态特征分析 热力景观形状指数昼夜差异显著, 白天明显高于夜间 (图 4), 这说明白天热力景观斑块受人为活动影响, 形状更为复杂; 从季节来看, 冬季各等级热力景观形状指数最大, 春季和秋季次之, 景观形状指数在夏季最小, 表征夏季热力景观斑块形状更为规则。比较不同等级热力景观形状指数, 中温区景观形状指数最大, 形状最为复杂, 受影响程度最大; 次低温区次之, 形状复杂程度有所降低; 高温区景观形状指数最小, 表现出最为简单和规则的景观斑块形状。

对比 2003 年和 2017 年不同等级热力景观形状指数变化, 白天各等级热力景观形状指数整体呈减小趋势, 说明白天热力景观形状趋于规则。其中, 次高温区减小趋势较为明显, 2003-2017 年冬季次高温区景观形状指数从 15.40 降低到 8.21。除春季外, 2003 年高温区景观形状指数均低于 2017 年, 高温区景观形状指数呈减小趋势, 冬季减小最为明显, 冬季减小 5.73, 高温斑块形状趋于规则; 春季高温区景观形状指数从 2.19 上升到 6.11, 说明春季高温斑块形状变得复杂。夜间, 低温区、次高温区和高温区景观形状指数均呈减小状态, 热力景观斑块形状越来越规则, 与之显著不同的是次低温区和中温区, 春季和冬季景观形状指数增加, 斑块形状变得复杂。

3.2.3 结构特征分析 地表热力景观聚合度指数昼夜和季节差异显著 (图 5)。整体来看,

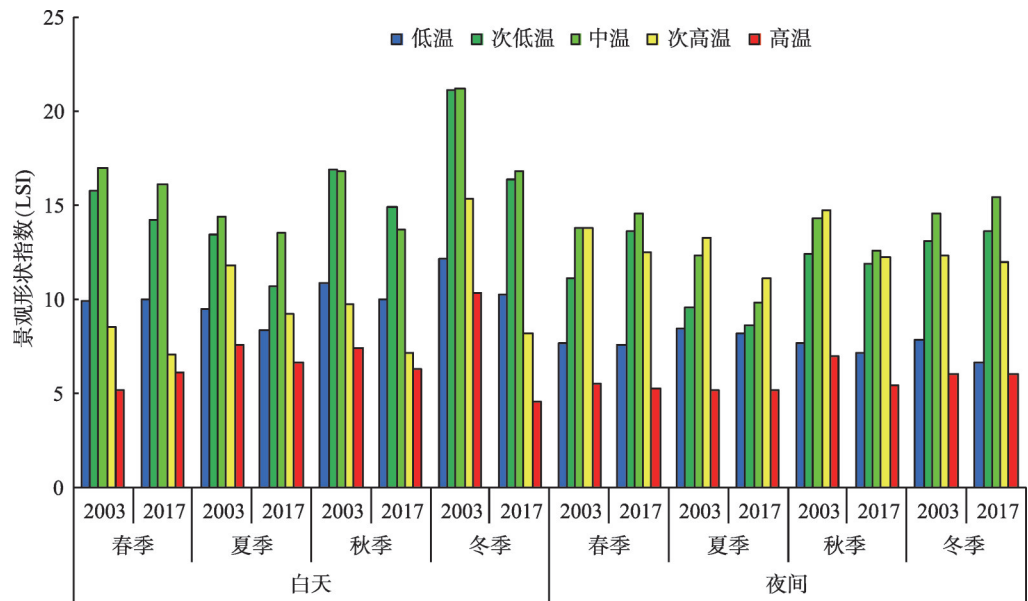


图4 2003年和2017年北京地表热力景观形状指数特征

Fig. 4 Characteristics of the landscape shape index according to the land surface thermal landscape pattern in Beijing in 2003 and 2017

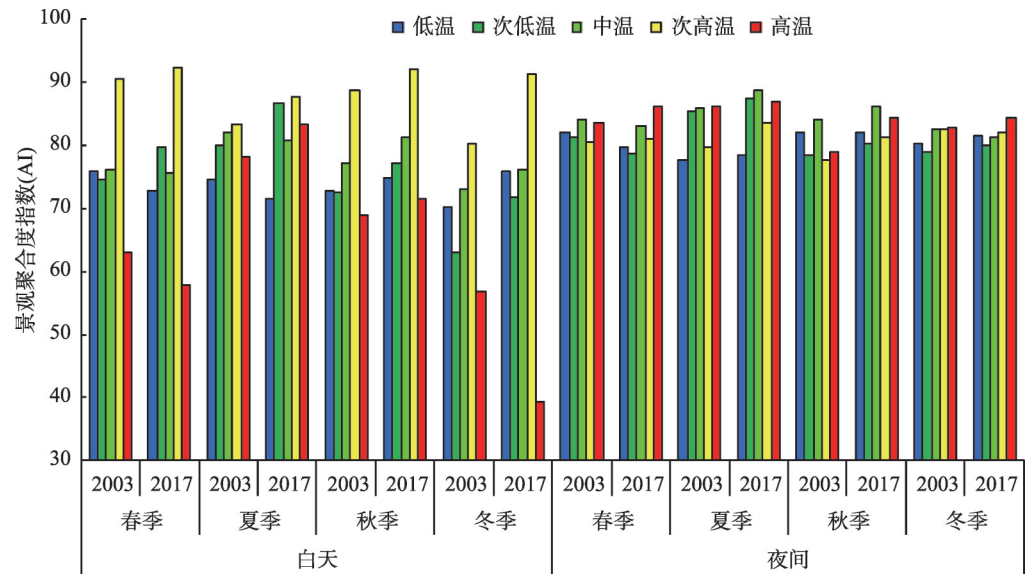


图5 2003年和2017年北京地表热力景观聚合度指数特征

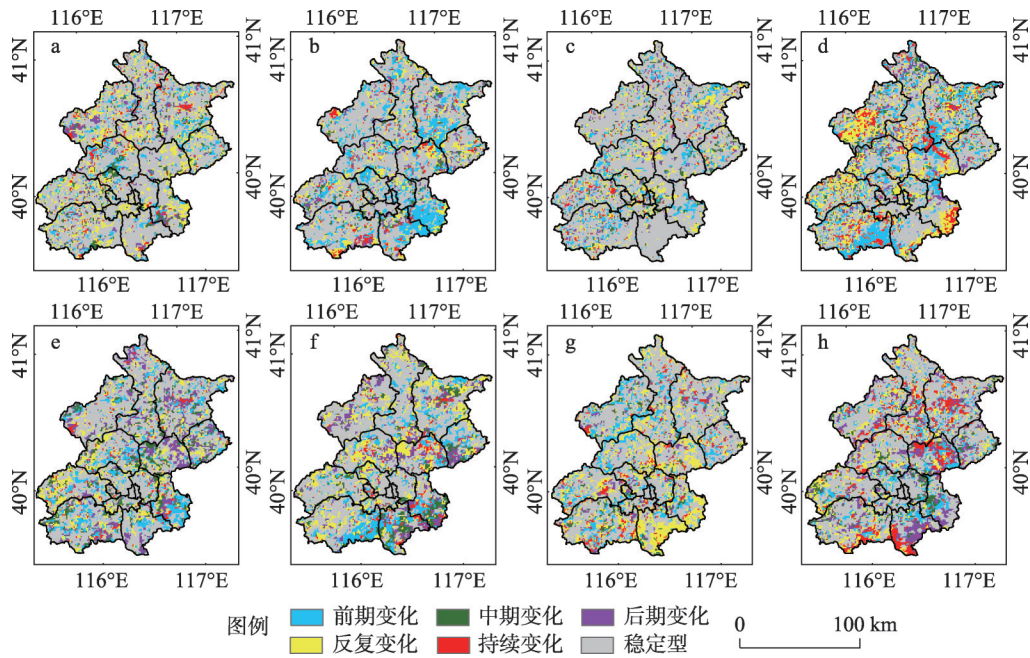
Fig. 5 Characteristics of the aggregation index according to the land surface thermal landscape pattern in Beijing in 2003 and 2017

白天各等级热力景观聚合度指数较夜间差异较大,说明热力景观在夜间空间聚合程度好,白天受到人类活动影响程度较大;从季节来看,除次高温区外,夏季白天各等级热力景观聚合度指数高于其他季节,表现出较好的聚合性,冬季白天各等级热力景观聚合度指数较低,说明冬季白天各等级热力景观斑块较为分散。对比不同等级热力景观,高温区、次高温区和中温区聚合度整体上较高,呈现出温度较高的斑块通常成片发展的趋势。

对比2003年和2017年不同等级热力景观聚合度指数变化。各等级热力景观斑块的聚合度整体增加,其中次高温区和高温区聚合度指数变化最显著。2017年夏季白天较2003年高温区聚合度指数增加5.10%,景观斑块呈现较强的空间聚合趋势。春季和冬季,高温区聚合度指数下降,说明斑块破碎度增加,表现出高温斑块易受人类活动干扰。次高温区聚合度指数增加最大,其中冬季白天增加11.07%。夜间各等级热力景观斑块的聚合度整体增加,景观斑块在夜间空间聚合度有所增强,表征斑块连通性增强。

3.3 地表热力等级变化图谱

2003-2017年北京市城市地表热力等级空间变化在季节和昼夜上呈现显著差异(图6)。整体来看,地表热力等级中稳定型占比最多,比例几乎均超过50%,分布范围遍及整个市域。除冬季外,白天稳定型区域明显高于夜间;其次是反复变化型和前期变化型区域,所占面积比例均在10%~20%。反复变化型主要体现在次低温区和中温区发生反复转向以及中温区和次高温区中发生反复转向;白天多表现为升温趋势且发生在城郊区,夜间多表现为降温趋势且发生在山区及城郊—山地交错地带;中期变化型和后期变化型均在城郊区呈现降温趋势;持续变化型在白天多表现为降温,夜间多表现为升温。冬季的持续变化型是最显著的,但所占面积比例未超过10%。



注: a~d分别为2003-2017年春、夏、秋、冬季节白天;e~h分别为2003-2017年春、夏、秋、冬季节夜间。

图6 2003-2017年北京市地表热力等级变化图谱

Fig. 6 The change in land surface temperatures in Beijing during 2003-2017

3.3.1 前期变化型 热力等级前期变化型在夏季白天和冬季白天较为突出,占全市面积比例接近20%。夏季白天,前期变化型主要分布在通州区和密云县,其中城郊区多由中温区转向次高温区(29.85%);城郊—山地交错地带多由次高温区转向中温区(21.48%);山区多表现为由中温区转向次低温区(19.38%);在城区中有部分区域由次高温区转为高温区(9.73%)。冬季白天前期变化型主要分布在城郊区,多由中温区转向次高温区(38.68%);城郊—山地交错地带多由次高温区转向中温区(19.37%);山区多由中温区

转向次低温区(12.51%)。整体来看,前期变化型多出现在城郊区、城郊—山地交错地带及山区,且城郊区呈现出逐级升温趋势,山区及城郊—山地交错地带呈现逐级降温趋势。

3.3.2 中期变化型 热力等级中期变化型夜间面积比白天大,占全市面积比例均在5%~8%之间,白天占全市面积比例均小于5%。春季夜间(32.14%)和冬季夜间(35.44%)中期变化型主要表现为由次高温区转向中温区,主要分布在城郊区;夏季夜间主要表现为由中温区转向次高温区(43.56%),多分布在城市建成区周边的平原地区。整体来看,除冬季白天中期变化型以在山区分布为主,其余季相主要分布在城市建成区周边的平原地区。除夏季夜间外,中期变化型大都呈现逐级降温的趋势。

3.3.3 后期变化型 热力等级后期变化型除秋季外,夜间面积比白天有明显增加。春季夜间(31.23%)和冬季夜间(35.66%)主要由中温区转向次低温区,夏季夜间主要由次高温区转向中温区(32.41%)。从空间分布来看,后期变化型主要分布在城郊区,呈现出逐级降温趋势。

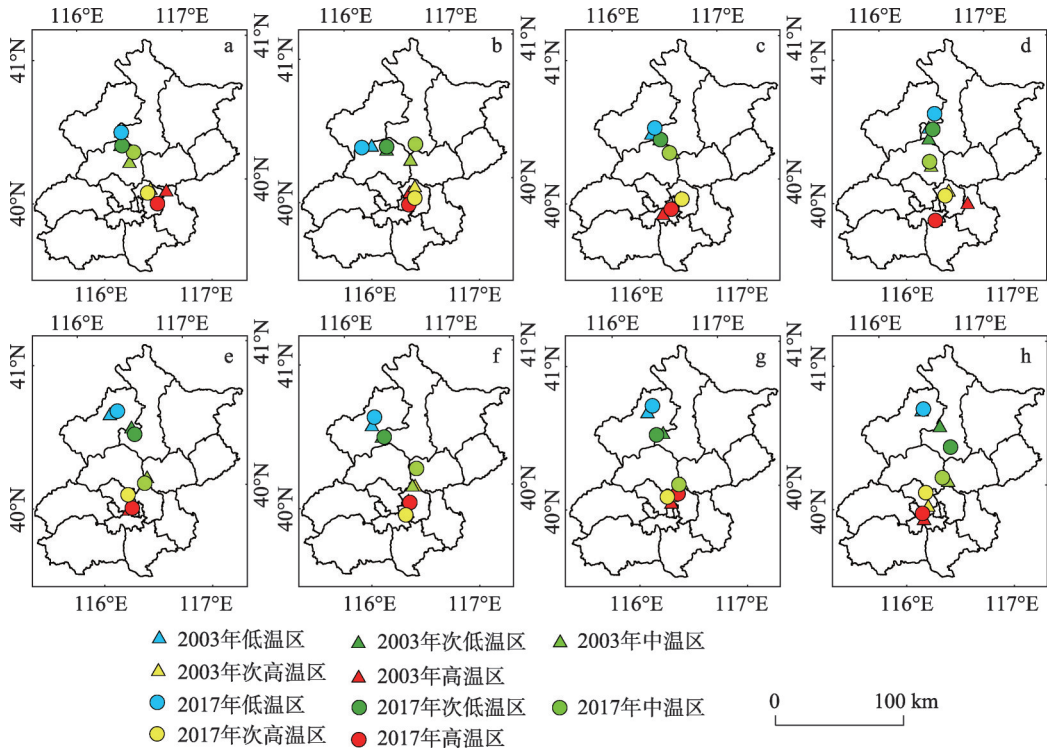
3.3.4 反复变化型 热力等级反复变化型季节和昼夜规律差异显著。白天,春季和冬季该区域所占全市面积比例较高,接近20%;夜间,秋季和夏季该区域面积比例较高,其中秋季夜间该区域面积比例达到20.24%。该类型在冬季白天主要表现为次高温—中温—次高温(29.15%)、中温—次低温—中温(28.27%)。其中,次高温转向中温主要发生在城区和城郊—山区交错地带,中温转向次低温主要分布在山区。春季白天主要表现为次高温—中温—次高温(25.74%)、中温—次低温—中温(16.73%)。其中,次高温转向中温主要发生在位于平原地区的城郊区,中温转向次低温主要发生在城郊—山区交错地带。从空间分布来看,从冬季到春季,相同热力等级转换类型区域向城市建成区迁移。夏季夜间主要表现为中温—次低温—中温(23.54%)、中温—次高温—中温(29.06%)。其中,中温转向次低温主要发生在城郊—山区交错地带,中温转向次高温主要发生在城区周围的平原地区。秋季夜间主要表现为中温—次低温—中温(36.87%)、中温—次高温—中温(19.84%)。其中,中温转向次低温主要分布在城市建成区周围的平原地区,中温转向次高温主要发生在城郊—山区交错地带。整体来看,次低温和中温的反复转向,主要发生在城郊—山区交错地带及山区,中温和次高温的反复转向主要发生在城郊区中的平原地区和城郊—山区交错地带。

3.3.5 持续变化型 热力等级持续变化型仅在冬季较为显著,占全市面积比例超过8%,其余各季节昼夜面积占比均不足5%。冬季白天主要表现为中温—次高温—中温—次高温(20.18%)和中温—次高温—高温—次高温(13.13%),主要分布在城郊—山区交错地带;冬季夜间主要表现为中温—次低温—中温—次低温(27.32%)、中温—次高温—中温—次高温(19.72%)和次低温—中温—次低温—中温(16.24%),主要分布在靠近城郊区的山区。各个季度和昼夜整体来看,持续变化型在白天多表现为升温,夜间多表现为降温。

3.3.6 稳定型 热力等级稳定型除冬季外,夜间面积比例明显小于白天。其中,秋季白天热力等级稳定型比例最大,达到68.54%,冬季白天最小(43.41%),但也明显高于其他热力等级变化类型。整体来看,低温区、次低温区和中温区稳定型主要分布在山区及城郊—山区交错地带,次高温区主要分布在城市建成区的平原地区,高温区主要分布在城市建成区。白天,次高温区稳定型占比最高;夜间,中温区稳定型占比最高。

3.4 地表热力景观质心迁移分析

3.4.1 地表热力景观质心迁移轨迹 地表热力景观质心呈现显著的空间差异(图7)。总体来看,高温区至低温区自南向北存在明显的空间梯度。其中,高温区和次高温区质心



注：a~d分别为春、夏、秋、冬季节白天；e~h分别为春、夏、秋、冬季节夜间。

图7 2003-2017年地表不同热力等级质心轨迹变化

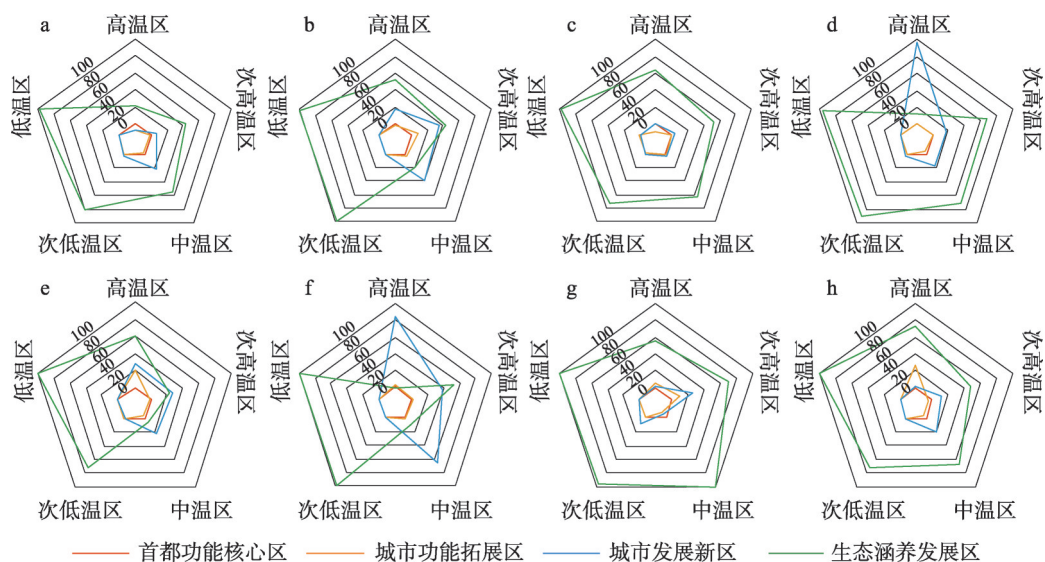
Fig. 7 Barycenter trajectories of land surface temperatures during 2003-2017

主要集中在东城区、西城区、石景山区、海淀区和朝阳区等“首都功能核心区”和“城市功能拓展区”；中温区质心主要集中于昌平区和顺义区等“城市发展新区”，夜间较白天更接近于中心城区；低温区和次低温区质心主要集中于延庆区和怀柔区等“生态涵养区”，夜间较白天分布规律更为明显。

对比2003-2017年地表热力景观质心迁移轨迹昼夜和季节差异。白天高温区质心表现出向城市中心迁移趋势，夜间变化不明显，说明白天城市外围高温斑块减少，中心城区高温斑块聚合性增强；次高温区质心白天无明显变化，夜间向城市外围有一定程度的移动，尤其是夏季和冬季夜间，表现出次高温区在夜间向外扩张的空间趋势；中温区质心昼夜均表现出向城市外围迁移的趋势，区别在于白天更多地从城市发展新区向生态涵养发展区迁移，夜间多从城市功能拓展区向城市发展新区迁移；次低温区质心迁移不明显，但也表现出一定的昼夜特征差异。白天，次低温区质心略微向城市外围迁移，夜间，质心向中心城区移动。尤其是冬季夜间，次低温区质心从怀柔区西北部向南部明显迁移；低温区质心整体向生态涵养发展区迁移，但较其他热力等级区域迁移程度明显减弱。

3.4.2 地表热力景观质心迁移区域贡献率 2003-2017年，不同城市功能区对地表热力景观质心迁移贡献差异显著（图8）。整体来看，生态涵养发展区地表热力景观空间格局变化对北京市地表热力景观质心迁移贡献率明显高于其他城市功能区，城市发展新区次之。城市功能拓展区仅在特定时间对北京市地表热力景观质心迁移有所贡献，首都功能核心区几乎无贡献。

对比不同地表热力景观等级质心迁移所受城市功能区的影响程度。2003-2017年，低



注: a~d分别为春、夏、秋、冬季节白天;e~h分别为春、夏、秋、冬季节夜间。

图8 2003-2017年热力景观质心迁移区域贡献率

Fig. 8 Contribution of urban functional zones to the barycenter trajectories of land surface temperatures during 2003-2017

温区质心迁移几乎完全由生态涵养发展区地表热力景观空间格局变化影响;生态涵养发展区对次低温区质心迁移贡献率较低温区小,但均在70%以上;中温区受城市发展新区影响程度明显增加。尤其在夏季昼夜,城市发展新区对中温区质心迁移贡献率分别为39.69%和65.60%,成为贡献率最大的城市功能区;次高温区受生态涵养区和城市发展新区影响较为明显,夏季昼夜两个功能区对次高温区质心迁移贡献率相近,春季夜间城市发展新区贡献率超过生态涵养区。针对高温区,生态涵养发展区贡献率明显降低,城市发展新区影响程度显著提高,尤其冬季白天和夏季夜间,城市发展新区贡献率均超过85%。城市功能拓展区贡献率有明显提高,尤其是春季夜间和冬季夜间,贡献率分别达到21.08%和27.28%。

4 结论与讨论

通过MODIS地表温度产品数据,绘制2003-2017年不同季相和昼夜间北京市地表热力景观时空分布格局,从数量、形状和结构角度选取不同景观指数分析城市地表热力景观时空分异特征,采用热力等级变化图谱及质心迁移轨迹揭示不同时相各等级热力景观演变规律,探究热力景观等级转换生态过程,有助于制定有效缓解城市热岛效应技术和管理措施。

通过研究得到以下结论:①北京市地表温度呈增长趋势,高温区面积增加,这与城市化进程中不透水面积扩张和人为热排放的增加直接相关;②中温区在北京城市热环境中占主导地位。白天,中温区是最不稳定的热力景观;夜间,次低温和次高温不稳定性增加,转向面积增大;③地表热力景观等级变化以稳定型占主,反复变化型和前期变化型次之。地表热力景观几乎不会发生剧烈转向,通常呈现逐级递增或递减规律,山区呈现逐级降温趋势,北部城郊—山地交错地带表现出次低温和中温的反复转向,南部地区有一定的升温趋势;④不同地表热力景观质心迁移呈现明显的季节和昼夜差异。高温区

向城市中心集中,低温区向城市外围扩散。生态涵养发展区热环境时空格局变化对北京市地表热力景观质心迁移最为敏感。

因此,在实际制定热岛效应减缓措施时,试图将高温区直接降至低温区或次低温区是不现实也不科学的,高温区最容易转向次高温区,再由次高温区转向中温区,尽量逐级规划或采取减缓措施来改善城市热环境。高温区多集中于城市中心城区,对新增建筑物材料和空间布局要严格控制,提高能源循环利用效率,对已有建筑采用增加建筑表面的湿度和反照率、增加植被覆盖度、减少人为热排放等措施改善其热环境;次高温区内科学布局城市空间发展规模并建立通风廊道和生态绿道等方式进一步削弱其热岛效应;中温区作为最不稳定区域以及从高温区向低温区过渡的区域,除以上措施外,通过划定城镇增长边界等规划管理措施防范新增城市用地使其热环境进一步恶化并对低温区形成屏障和保护,具有重要的科学意义。对于生态涵养发展区等低温区,作为城市热环境的“汇”区,其变化对整个区域热环境贡献率最大,因此亟待大力保护。针对该区域,从外部科学设计最小生态安全距离,避免由城市建设用地肆意扩展所带来的增温效应,从内部着力在“增绿”、“护蓝”上下功夫,发挥其生态用地降温效应。在未来城市热环境研究中,仅通过观测和遥感技术手段是不全面的,应加强数值模式对各种减缓措施进行定量模拟,比较不同情景下城市热环境减缓效率,从而为有效缓解城市热岛效应提供参考及建议。

参考文献(References)

- [1] Shao Quanqin, Sun Chaoyang, Liu Jiyan, et al. Impact of urban expansion on meteorological observation data and overestimation to regional air temperature in China. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1292-1302. [邵全琴, 孙朝阳, 刘纪远, 等. 中国城市扩展对气温观测的影响及其高估程度. *地理学报*, 2009, 64(11): 1292-1302.]
- [2] Peng Baofa, Shi Yishao, Wang Hefeng, et al. The impacting mechanism and laws of function of urban heat islands effect: A case study of Shanghai. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1461-1471. [彭保发, 石忆邵, 王贺封, 等. 城市热岛效应的影响机理及其作用规律: 以上海市为例. *地理学报*, 2013, 68(11): 1461-1471.]
- [3] Xie Qijiao, Liu Jinhua, Hu Daohua, et al. Urban expansion and its impact on spatiotemporal variation of urban thermal characteristics: A case study of Wuhan. *Geographical Research*, 2016, 35(7): 1259-1272. [谢启姣, 刘进华, 胡道华, 等. 武汉城市扩张对热场时空演变的影响. *地理研究*, 2016, 35(7): 1259-1272.]
- [4] Wang Fang, Ge Quansheng. Estimation of urbanization bias in observed surface temperature change in China from 1980 to 2009 using satellite land-use data. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(11): 1708-1715. [王芳, 葛全胜. 根据卫星观测的城市用地变化估算中国1980-2009年城市热岛效应. *科学通报*, 2012, 57(11): 951-958.]
- [5] Weng Q H. Fractal analysis of the satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(5): 555-566.
- [6] Yue Wenzhe, Xu Lihua. Thermal environment effect of urban land use type and pattern: A case study of central area of Shanghai City. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 243-248. [岳文泽, 徐丽华. 城市土地利用类型及格局的热环境效应研究: 以上海市中心城区为例. *地理科学*, 2007, 27(2): 243-248.]
- [7] Meng Dan, Li Xiaojuan, Gong Huili, et al. The thermal environment landscape pattern and typical urban landscapes effect linked with thermal environment in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3491-3500. [孟丹, 李小娟, 宫辉力, 等. 北京地区热力景观格局及典型城市景观的热环境效应. *生态学报*, 2010, 30(13): 3491-3500.]
- [8] Chen Yunhao, Shi Peijun, Li Xiaobing, et al. Research on urban spatial thermal environment using remote sensing image: Fractal measurement of thermal field structure & its change. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(4): 322-326. [陈云浩, 史培军, 李晓兵, 等. 城市空间热环境的遥感研究: 热场结构及其演变的分形测量. *测绘学报*, 2002, 31(4): 322-326.]
- [9] Chen Yunhao, Shi Peijun, Li Xiaobing. Research on spatial thermal environment in Shanghai City based on remote sensing and GIS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 139-144. [陈云浩, 史培军, 李晓兵. 基于遥感和GIS的上海城市空间热环境研究. *测绘学报*, 2002, 31(2): 139-144.]
- [10] Huang Huanchun, Yun Yingxia, Wang Shizhen. Studies of the Mechanism of the Urban Heat Island Formation,

- Evolution and Planning Strategies. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. [黄焕春, 运迎霞, 王世臻. 城市热岛的形成演化机制与规划对策. 中国建筑工业出版社, 2016.]
- [11] Zhang Tian, Liu Yanxu, Peng Jian, et al. Correlation of the landscape ecological risk on multiscales in Shenzhen City. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2478-2486. [张甜, 刘焱序, 彭建, 等. 深圳市景观生态风险多尺度关联分析. 生态学报, 2016, 35(9): 2478-2486.]
- [12] Chen Yunhao, Li Xiaobing, Shi Peijun, et al. Study on spatial pattern of urban heat environment in Shanghai City. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3): 317-323. [陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 上海城市热环境的空间格局分析. 地理科学, 2002, 22(3): 317-323.]
- [13] Chen Ailian, Sun Ranhao, Chen Liding. Studies on urban heat island from a landscape pattern view: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4553-4565. [陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.]
- [14] Liu Yanxu, Peng Jian, Wang Yanglin. Relationship between urban heat island and landscape patterns: From city size and landscape composition to spatial configuration. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(23): 1-12. [刘焱序, 彭建, 王仰麟. 城市热岛效应与景观格局的关联: 从城市规模、景观组分到空间构型. 生态学报, 2017, 37(23): 1-12.]
- [15] Meng Dan, Wang Mingyu, Li Xiaojuan, et al. The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1545-1558. [孟丹, 王明玉, 李小娟, 等. 京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究. 生态学报, 2013, 33(5): 1545-1558.]
- [16] Tang Ze, Zheng Haifeng, Ren Zhibin, et al. Spatial and temporal changes to urban surface thermal landscape patterns: a case study of Changchun City. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 1-10. [唐泽, 郑海峰, 任志彬, 等. 城市地表热力景观格局时空演变: 以长春市为例. 生态学报, 2017, 37(10): 1-10.]
- [17] Chen Ailian, Sun Ranhao, Chen Liding. Applicability of traditional landscape metrics in evaluating urban heat island effect. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(8): 2077-2086. [陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 传统景观格局指数在城市热岛效应评价中的适用性. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2077-2086.]
- [18] Jiang Xueding, Xia Beicheng. Spatial characteristics and dynamic simulations of urban heat environment of cities in Pearl River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1461-1470. [江学顶, 夏北成. 珠江三角洲城市群热环境空间格局动态. 生态学报, 2007, 27(4): 1461-1470.]
- [19] Quan Ling, Zhou Ji, Li Mingsong, et al. Island based on time series modeling and its application. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 723-733. [权凌, 周纪, 李明松, 等. 基于时间序列建模的城市热岛时间尺度成分分离方法与应用. 地球科学进展, 2014, 29(6): 723-733.]
- [20] Fang Yingbo, Zhan Wenfeng, Huang Fan, et al. Hourly variation of surface urban heat island over the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(2): 187-198. [方迎波, 占文凤, 黄帆, 等. 长三角城市群表面城市热岛日内逐时变化规律. 地球科学进展, 2017, 32(2): 187-198.]
- [21] Sun Qinqin, Wu Zhifeng, Tan Jianjun. Spatio-temporal changes of urban thermal environment with thermal centroid in Guangzhou. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(4): 620-623. [孙芹芹, 吴志峰, 谭建军. 基于热力重心的广州城市热环境时空变化分析. 地理科学, 2010, 30(4): 620-623.]
- [22] Quan Jinling, Chen Yunhao, Zhan Wenfeng, et al. Moving trajectory of urban heat island in Beijing, China based on Gaussian Model. *Chinese Science and Technology Paper Online*, 2013. [全金玲, 陈云浩, 占文凤, 等. 基于高斯模型的北京城市热岛重心移动轨迹监测. 中国科技论文在线, 2013.]
- [23] Qiao Z, Tian G J, Zhang L X, et al. Influences of urban expansion on urban heat island in Beijing during 1989-2010. *Advances in Meteorology*, 2014. Article ID 187169, 11 pages.
- [24] Qiao Zhi, Tian Guangjin. Spatiotemporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing. *Journal of Remote Sensing*, 2014, 18(3): 725-734. [乔治, 田光进. 北京市热环境时空分异与区划. 遥感学报, 2014, 18(3): 715-734.]
- [25] Cui Yaoping, Liu Jiyan, Qin Yaochen, et al. The impact of urban sprawl on heat island intensity in Beijing. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(12): 3485-3493. [崔耀平, 刘纪远, 秦耀辰, 等. 北京城市扩展对热岛效应的影响. 生态学报, 2015, 34(12): 3485-3493.]
- [26] Qu Yiting, Meng Dan, Li Xiaojuan. Study on urban expansion and its influence on urban warming effect in Beijing. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(2): 77-83. [屈益挺, 孟丹, 李小娟. 北京市城市扩张及其对城市增温效应的影响. 首都师范大学学报(自然科学版), 2017, 38(2): 77-83.]
- [27] Qiao Zhi, Tian Guangjin. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(3): 476-484. [乔治, 田光进. 基于MODIS的

- 2001-2012年北京热岛足迹及容量动态监测. 遥感学报, 2015, 19(3): 476-484.]
- [28] Ge Rongfeng, Wang Jingli, Zhang Llixiao, et al. Impacts of urbanization on the urban thermal environment in Beijing. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(19): 6040-6049. [葛荣凤, 王京丽, 张力小, 等. 北京市城市化进程中热环境响应. 生态学报, 2016, 36(19): 6040-6049.]
- [29] Liu Yonghong, Fang Xiaoyi, Zhang Shuo, et al. Research on quantitative evaluations of heat islands for the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 37(17): 1-18. [刘勇洪, 房小怡, 张硕. 京津冀城市群热岛定量评估. 生态学杂志, 2017, 37(17): 1-18.]
- [30] Oke T R. The energetic basis of the urban heat island. *Royal Meteorological Society*, 1982, 108(445): 1-24.
- [31] Xie Miaomiao, Wang Yanglin, Fu Meichen. An overview and perspective about causative factors of surface urban heat island effects. *Progress In Geography*, 2011, 31(1): 35-41. [谢苗苗, 王仰麟, 付梅臣. 城市地表温度热岛影响因素研究进展. 地理科学进展, 2011, 31(1): 35-41.]
- [32] Cui Yaoping, Liu Jiyuan, Zhang Xuezhen, et al. Modeling urban energy balance and temperature differences of different underlying surfaces. *Geographical Research*, 2012, 31(7): 1257-1268. [崔耀平, 刘纪远, 张学珍, 等. 城市不同下垫面的能量平衡及温度差异模拟. 地理研究, 2012, 31(7): 1257-1268.]
- [33] Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, et al. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land use/land cover components by coupling remote sensing modeling with in situ measurement. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120: 113-130.
- [34] Wang Jiankai, Wang Kaicun, Wang Pucui. Urban heat (or cool) island over Beijing from MODIS land surface temperature. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(3): 330-339. [王建凯, 王开存, 王普才. 基于MODIS地表温度产品的北京城市热岛(冷岛)强度分析. 遥感学报, 2007, 11(3): 330-339.]
- [35] Qiao Z, Tian G J, Xiao L. Diurnal and seasonal impacts of urbanization on the urban thermal environment: A case study of Beijing using MODIS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 85: 93-101.
- [36] Zhan W F, Ju W M, Hai S P, et al. Satellite-derived subsurface urban heat island. *Environment Science & Technology*, 2014, 48: 12134-12140.
- [37] Sun R H, Chen L D. Effects of green space dynamics on urban heat islands: Mitigation and diversification. *Ecosystem Services*, 2017, 23: 38-46.
- [38] Wan Z, Zhang Y L, Zhang Q C, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 261-274.
- [39] Jiang Jing, Qiao Zhi. Impact analysis of land surface temperature (LST) land use change on Beijing. *Remote Sensing Information*, 2012, 27(3): 105-111. [蒋晶, 乔治. 北京市土地利用变化对地表温度的影响分析. 遥感信息, 2012, 27(3): 105-111.]
- [40] Han Dongrui, Xu Xinliang, Li jing, et al. Study on the security pattern of the heat environment and the influence of land use change in the Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Geo-information Science*, 2017, 19(1): 39-49. [韩冬锐, 徐新良, 李静, 等. 长江三角洲城市群热环境安全格局及土地利用变化影响研究. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 39-49.]
- [41] Zhou W Q, Huang G L, Cadenasso M L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102: 54-63.
- [42] Huang Jucong, Zhao Xiaofeng, Tang Lina, et al. Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanization: A case study of Xiamen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(2): 622-631. [黄聚聪, 赵小锋, 唐立娜, 等. 城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征: 以厦门市为例. 生态学报, 2012, 32(2): 622-631.]
- [43] Chen A L, Yao X A, Sun R H, et al. Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2014, 13: 646-654.
- [44] Peng J, Xie P, Liu Y X, et al. Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 173: 145-155.
- [45] Yang J, Sun J, Ge Q S, et al. Assessing the impacts of urbanization-associated green space on urban land surface temperature: A case study of Dalian, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 22: 1-10.
- [46] Wu Xuwei, Xu Yaming, Gong Wenfeng. Graphical information characteristics of urban heat island spatial pattern and its change. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1711-1718. [吴学伟, 徐亚明, 龚文峰, 等. 城市热岛空间格局及其变化的图形信息特征分析. 武汉大学学报信息科学版, 2017, 42(12): 1711-1718.]

Spatio-temporal pattern and evolution of the urban thermal landscape in metropolitan Beijing between 2003 and 2017

QIAO Zhi¹, HUANG Ningyu¹, XU Xinliang², SUN Zongyao³, WU Chen¹, YANG Jun⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Beijing 100101, China; 3. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 4. Human Settlements Research Center, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Urban heat islands resulting from land use and land cover change have become a major barrier to urbanization and sustainable development of ecological urban environments. Although many studies have focused on the interannual and seasonal characteristics of urban heat islands, there has been no comparative analysis of the urban surface thermal landscape at multiple spatio-temporal scales. This study described the spatio-temporal patterns of the urban surface thermal landscape in different seasons and by time of day (daytime/nighttime) in terms of quantity, shape, and structure using MODIS LST products, and revealed the evolution of the urban surface thermal landscape using mapping techniques and analysis of barycenter trajectories in metropolitan Beijing between 2003 and 2017. The conclusions were as follows: (1) The characteristics of the urban surface thermal landscape vary significantly in different seasons and by time of day. (2) The medium-temperature zone constitutes the largest proportion of the area of metropolitan Beijing, which is the most unstable area during the daytime and the instability of the sub-high-temperature and sub-low-temperature zones increased at night. (3) The stable zone is most important in terms of the change in the land surface thermal landscape, followed by the repeated-changes zone and the zone where the change occurred in the first 5 years. The changes of different temperature zones usually increased or decreased progressively. There was a cooling trend in the mountains. In the north mountain-transition zone, the process of transferring between sub-low temperature and medium temperature was repeated. There was a warming trend in the south. (4) The area of the high-temperature zone increased from 2003 to 2017 and its barycenter was concentrated in the city center; the barycenter of the low-temperature zone moved to the urban fringe. The ecological conservation development zone made the greatest contribution to the surface thermal landscape in metropolitan Beijing. The spatio-temporal distribution and evolution of the urban surface thermal landscape support management decisions aimed at alleviating the effect of the urban heat island.

Keywords: urban thermal landscape; spatiotemporal pattern; transition probability matrix; barycenter trajectory; MODIS; Beijing